

---

# Application à l'assemblage des ouvrants d'une caisse de véhicule

---

*"Une connaissance est une information validée par l'expérience."* (Albert Einstein)

## *Résumé*

---

Ce chapitre présente une application industrielle de la méthode d'analyse et d'évaluation des solutions de reconfiguration. L'objectif est d'appliquer notre approche dans le cadre de l'introduction d'un nouveau produit dans une usine existante. Ce cas d'étude montre les principales problématiques rencontrées lors d'une étude d'avant-projet d'industrialisation dans l'automobile. Le cas d'une unité d'assemblage de portes de coffre de véhicule est utilisé pour illustrer nos propositions.

---

## Sommaire

---

<b>VI.1 Contexte de l'étude : assemblage des ouvrants . . . . .</b>	<b>141</b>
VI.1.1 Généralités sur le processus d'assemblage des "ouvrants" . . . . .	142
VI.1.2 Objectifs de l'étude . . . . .	143
VI.1.3 Description de la configuration initiale . . . . .	143
VI.1.4 Objectifs de production : capacité et diversité . . . . .	144
<b>VI.2 Recherche de solutions . . . . .</b>	<b>145</b>

---

## **Chapitre VI. Application : assemblage des "ouvrants" d'une caisse de véhicule**

---

VI.2.1 Mise en œuvre de la stratégie de reconfiguration . . . . .	145
VI.2.2 Identification des solutions . . . . .	146
<b>VI.3 Evaluation des solutions . . . . .</b>	<b>148</b>
VI.3.1 Evaluation des critères métier . . . . .	148
VI.3.2 Evaluation des critères projet . . . . .	150
<b>VI.4 Conclusions . . . . .</b>	<b>155</b>

---

## **VI.1. Contexte de l'étude : assemblage des ouvrants**

---

La première partie de ce manuscrit a présenté le contexte et l'état de l'art sur l'analyse et l'évaluation du processus de reconfiguration d'une ligne de production. La deuxième partie a présenté les propositions dont la première consiste à identifier les solutions avec une approche progressive. La deuxième consiste en une approche multicritère basée sur des critères métier et projet. La troisième consiste en un processus de revue numérique de la solution retenue.

Cette troisième et dernière partie du manuscrit développe sur une application les propositions concernant l'analyse, l'évaluation et la validation des choix de reconfiguration d'une ligne de production, puis présente une conclusion générale sur le travail de thèse. Ce chapitre présente une application industrielle des méthodes proposées à travers une étude de cas sur la reconfiguration d'une unité d'assemblage de portes de coffre de véhicule.

L'étude se situe dans la phase avant-projet d'industrialisation d'un nouveau véhicule dans une usine de fabrication donnée. Le choix d'affectation de ce véhicule est en dehors du périmètre de cette étude. Nous nous focaliserons plutôt sur l'analyse des différentes solutions possibles pour faire évoluer la configuration du système de production existant afin de prendre en compte la fabrication du nouveau véhicule. La première étape consiste à identifier les stratégies de reconfigurations possibles et les modifications nécessaires. La deuxième étape consiste à évaluer ces solutions en vue de proposer au décideur un classement et une synthèse pour faire son choix. La dernière étape qui concerne la validation de la solution retenue dans le cadre d'une revue numérique d'atelier ne sera pas traitée dans ce chapitre.

La première section présente le contexte de l'étude de cas sur l'assemblage des portes de coffre d'un véhicule, la deuxième section développe la méthode de reconfiguration progressive en vue d'identifier les solutions potentielles. La troisième section fournit une évaluation et une synthèse permettant de choisir parmi ces solutions.

## **VI.1 Contexte de l'étude : assemblage des ouvrants**

Dans une ligne d'assemblage de caisse de véhicule, la gamme d'assemblage type d'une portière de véhicule est présentée dans la figure VI.1.

Nous allons d'abord décrire le périmètre du processus d'assemblage des ouvrants, puis définir les objectifs de l'étude. Ensuite, nous définissons la configuration initiale de l'unité de production dans l'usine de fabrication et enfin nous détaillons les contraintes et les objectifs de production.

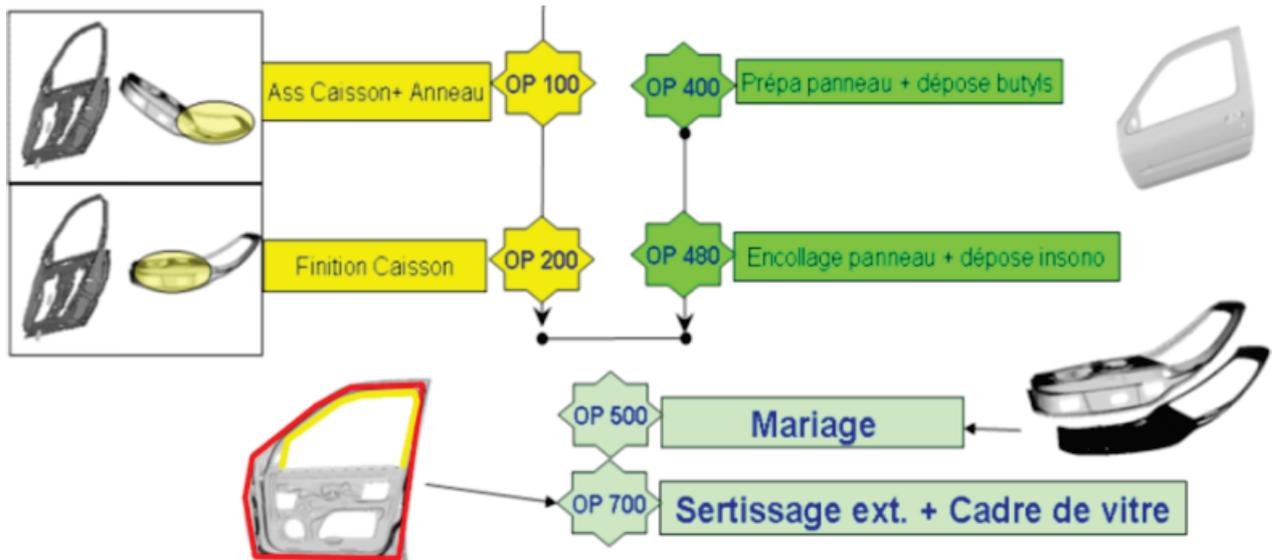


Figure VI.1 – Gamme d'assemblage d'une portière de caisse de véhicule

### VI.1.1 Généralités sur le processus d'assemblage des "ouvrants"

Un "ouvrant" désigne un élément d'ouverture qui permet d'accéder à l'intérieur du véhicule. Il s'agit principalement des portières, du capot et de la porte de coffre. Ces derniers peuvent avoir différentes configurations en fonction du type de caisse du véhicule (Pour plus de détail sur les différents types de caisse de véhicule, voir en annexe B.1).

Une unité d'assemblage d'ouvrants est généralement composée de plusieurs lignes permettant d'assembler :

- Les portes avant, côté gauche et droit (PAV)
- Les portes arrière, côté gauche et droit (PAR)
- Le capot (CAP) et la porte de coffre (PDC)

Une ligne d'assemblage type d'un ouvrant est composée de deux îlots principaux :

- Un îlot de **préparation** sur 2 ou 3 postes de travail permettant d'assembler indépendamment la partie intérieure et la partie extérieure de l'ouvrant.
- Un îlot de **sertissage** sur plateau tournant permettant d'assembler ces deux pièces par déformation mécanique des bords des pièces. Plusieurs outillages sont fixés sur le plateau tournant pour assembler différentes variantes d'ouvrants.

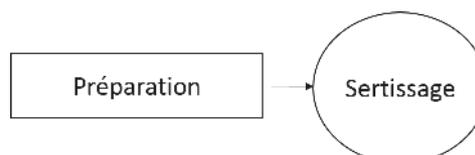


Figure VI.2 – Schéma d'une configuration type de ligne d'assemblage d'ouvrant

## VI.1. Contexte de l'étude : assemblage des ouvrants

### VI.1.2 Objectifs de l'étude

L'objectif de l'étude est d'analyser l'impact de l'introduction d'un nouveau véhicule X dans une usine qui produit déjà d'autres véhicules A, B, C et D. Cette analyse nécessite d'évaluer plusieurs solutions de reconfiguration du système de production existant. Le véhicule X présente deux diversités (1) et (2) dont les spécificités sont détaillées plus bas. La diversité d'un modèle de véhicule correspond à une variante de type caisse (ex : break, monospace, cabriolet). La diversité d'une pièce correspond à une variante de cette pièce pour un modèle de véhicule.

La figure VI.3 présente une synthèse de la production de chaque variante de véhicule dans les années à venir. Initialement (année N), les quatre véhicules sont en production, on souhaite démarrer la production du véhicule X dans 2 ans (N+2).

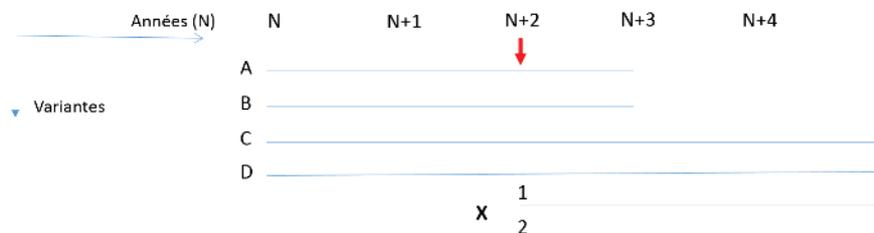


Figure VI.3 – Planification de la production intégrant les futurs véhicules à fabriquer

### VI.1.3 Description de la configuration initiale

La configuration initiale de l'unité d'assemblage des ouvrants est composée de 3 lignes robotisées : une ligne pour les portes avant, une ligne pour les portes arrière et une autre pour le capot et les portes de coffres. Les moyens d'assemblages installés permettent de fabriquer 4 variantes de véhicules différents. Cette flexibilité est garantie par des changements d'outillages automatisés dans les îlots de préparation et des outillages fixes sur plateau tournant dans les îlots de sertissage.

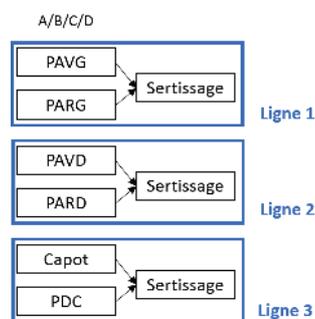


Figure VI.4 – Configuration initiale

### VI.1.4 Objectifs de production : capacité et diversité

Le véhicule X est une évolution majeure du véhicule existant A. Plusieurs pièces sont donc communes. Il s'agit des portes avant (PAV) et arrières (PAR). Deux variantes de ce véhicule seront produites, si possible dans les mêmes installations :

- une diversité X(1) qui possède une nouvelle porte de coffre (PDC1) et un nouveau capot commun à 1 et 2 (CAPX).
- une diversité X(2) qui possède une nouvelle porte de coffre (PDC2) et un nouveau capot commun à 1 et 2 (CAPX)

Il y aura donc des hypothèses de capacité et de diversités à gérer.

#### VI.1.4.1 Assurer la capacité demandée

Etant donné que le véhicule X partage les mêmes portes avant et arrière, son introduction nécessite de gérer la capacité des unités permettant d'assembler ces pièces. Dans cette étude, deux hypothèses de capacité globale de l'usine sont prises comme références pour la recherche de solution. La première hypothèse correspond au maintien de la capacité de production globale de l'usine. La deuxième hypothèse consiste à augmenter la capacité de production de l'usine d'environ 30%.

#### VI.1.4.2 Fabriquer l'ensemble de la diversité demandée

Etant donné que le véhicule X possède de nouvelles portes de coffre et un nouveau capot, des hypothèses de diversités sont à étudier dans les modifications à prévoir sur la configuration initiale. En effet, la flexibilité de la configuration initiale est limitée à 4 diversités due au nombre d'outillages disponibles dans l'îlot de sertissage. Cela implique de prévoir une capacité supplémentaire permettant de gérer ces nouvelles diversités.

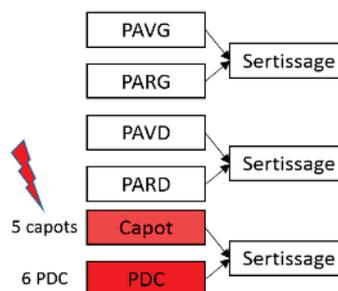


Figure VI.5 – Problème lié à la diversité sur la configuration initiale

Dans cette section, nous avons présenté le contexte du cas d'étude à travers une description du périmètre d'assemblage des ouvrants, des objectifs de l'étude de cas et

## VI.2. Recherche de solutions

---

des contraintes de production. Dans la section suivante nous nous basons sur ces hypothèses pour la recherche de solutions permettant de reconfigurer la ligne existante.

## VI.2 Recherche de solutions

Dans cette section, l'objectif est de mettre en œuvre la stratégie de reconfiguration progressive pour identifier les solutions en fonction de leur impact sur la configuration initiale. Les solutions sont parcourues par ordre d'impact croissant des modifications à implémenter.

### VI.2.1 Mise en œuvre de la stratégie de reconfiguration

Le principe de la reconfiguration progressive consiste à identifier les solutions par degré d'impact croissant sur la configuration initiale de la ligne de production. Trouver en premier lieu les solutions qui impliquent le moins de modification possible à effectuer sur le système existant.

En appliquant ce principe à la capacité de production, nous chercherons d'abord à identifier des solutions avec une première hypothèse de maintien de la capacité de production existante (H1). Ensuite, envisager une augmentation de capacité si nécessaire (H2).

Dans le premier cas, le point bloquant qui ne permet pas de fabriquer les deux diversités de portes de coffres se situe au niveau de l'îlot de sertissage. L'application d'une reconfiguration locale à ce niveau consiste à ajouter deux outillages supplémentaires qui peut se concrétiser par l'ajout d'un îlot de sertissage de plus qui comporte au moins deux positions d'outillage (H1A). Cette solution nécessite de modifier le mode de fonctionnement de l'îlot de préparation car au lieu d'avoir quatre changements d'outillages réguliers, il faudrait en prévoir six. Afin d'éviter cela, une solution moins locale qui consisterait à ajouter une ligne complémentaire de même type qui produirait les deux diversités de plus (H1B).

Dans le deuxième cas, une augmentation de la demande commerciale est prévue. Cela implique d'augmenter la capacité de production existante en prenant en compte les deux diversités de plus à fabriquer. L'ajout d'une ligne complémentaire pose la question du niveau de robotisation à spécifier. Une ligne robotisée (H2A) est moins contraignante en production mais coûte chère en investissement. Une ligne manuelle (H2B) est moins cher en investissement mais le mode de fonctionnement est plus contraignant en production. En termes d'impact sur la configuration existante, la ligne robotisée est plus compacte (voir fig. VI.6) en termes d'implantation par rapport à la solution manuelle

(fig. VI.7). Une dernière solution plus impactante en termes d'implantation et de configuration de ligne consiste à revoir entièrement l'architecture de la ligne existante pour pouvoir installer un processus d'assemblage flexible à huit diversités (H2C). Ce nouveau processus d'assemblage correspond à une solution prédéfinie et standardisée.

## **VI.2.2 Identification des solutions**

Les solutions identifiées pour intégrer le nouveau véhicule dans les installations existantes consistent à gérer des hypothèses d'augmentation de capacité et des hypothèses de gestion de la diversité.

- H1- Maintien de la capacité initiale de l'usine
  - H1A – Ajouter un poste de sertissage pour les deux diversités en plus
  - H1B – Ajouter une ligne complémentaire pour les deux diversités en plus
- H2- Augmentation de la capacité de l'usine (env. 33% de la capacité initiale)
  - H2 A – Ajouter une ligne robotisée pour la capacité supplémentaire
  - H2 B – Ajouter une ligne manuelle pour la capacité supplémentaire
  - H2 C – Installer une nouvelle ligne flexible à 8 diversités

On note qu'il s'agit d'hypothèses de solution qui peuvent changer durant le projet. Ces changements peuvent être liés à de nouvelles spécifications du produit ou de nouvelles contraintes de production.

Nous détaillons ci-dessous chacune de ces solutions pour expliquer en quoi elles consistent :

### **VI.2.2.1 H1- Maintenir la capacité initiale de l'usine**

Cette hypothèse correspond à un scénario de prévision de vente stable de l'ensemble des véhicules à produire dans les années à venir. De ce fait, la capacité globale de l'usine peut être maintenue au même niveau.

La conséquence directe pour l'unité d'assemblage qui nous intéresse, c'est à dire l'assemblage des portes de coffres et du capot de l'ensemble des véhicules, c'est la nécessité de gérer les diversités de pièces supplémentaires à produire pour le nouveau véhicule X.

**H1A- Ajout d'un poste de sertissage pour les deux diversités en plus** Afin de fabriquer les pièces supplémentaires des diversités de capot (CAPX) et de porte de coffre (PDC1 et PDC2), il est possible de réutiliser la ligne de préparation existante

## VI.2. Recherche de solutions

---

(Ligne 3 de la figure VI.4). En effet, cet îlot de préparation fonctionne par changement d'outillage sur chacun des postes de travail.

Les modifications au niveau de cet îlot consistent à prévoir 2 outillages supplémentaires plus des moyens de stockage spécifiques à ces deux diversités à la sortie de l'îlot. Par contre, la capacité des outillages de l'îlot de sertissage est limitée à 4 diversités. Il est nécessaire d'implanter un îlot supplémentaire avec deux outillages fixes qui sont spécifiques aux deux nouvelles diversités de pièces pour le nouveau véhicule X.

### H1B- Ajout d'une ligne d'ouvrant complémentaire pour les deux diversités en plus

Cette solution consiste à implanter un nouvel îlot de préparation, c'est à dire ne pas réutiliser l'îlot de préparation afin d'éviter les problèmes liés à l'augmentation du nombre de changements d'outillage et donc de la réduction des temps de production.

#### VI.2.2.2 H2-Augmenter la capacité de l'usine

Cette hypothèse correspond à un scénario d'augmentation des ventes d'un véhicule en cours de production et une éventualité d'anticiper l'intégration d'un futur véhicule après le véhicule X qu'on est en train d'étudier. L'augmentation estimée de la capacité de l'usine est d'environ 33%.

Afin de réutiliser au mieux les installations existantes, une autre solution consiste à ajouter une ligne correspondante à la capacité supplémentaire dont on a besoin. Cette ligne peut être soit manuelle, soit robotisée.

**H2A – Ajouter une ligne robotisée pour la capacité supplémentaire** Dans le cas d'une solution robotisée, deux lignes sont ajoutées. Une ligne pour les portes latérales, avant et arrière puis une autre ligne pour les capots et les portes de coffre. Ces lignes complémentaires sont capables de fabriquer 4 diversités de pièces.

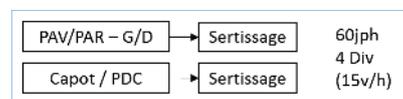


Figure VI.6 – Ajouter une ligne robotisée

**H2B – Ajouter une ligne manuelle pour la capacité supplémentaire** Il est également possible d'opter pour une solution manuelle. Dans ce cas, trois lignes sont ajoutées. Une ligne pour les portes latérales une autre pour les portes avant et arrière puis une autre ligne pour les capots et les portes de coffre. Chacune de ces lignes est capable de fabriquer 2 diversités de ligne.

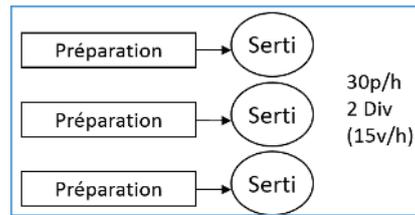


Figure VI.7 – Ajouter une ligne manuelle

**H2C- Installer une nouvelle ligne flexible à 8 diversités** Cette solution consiste à installer une nouvelle configuration des lignes d'assemblage d'ouvrants. Une ligne dite "capacitaire" permet de fabriquer l'ensemble des variantes de produits sur un même tronçon sans dédoublement de flux. La figure VI.8 montre cette différence de configuration en termes d'affectation des types de porte aux lignes. La configuration initiale assemble les portes avant ou arrière sur la même ligne tandis que la configuration envisagée pour cette solution assemble les portes latérales (gauches et droites) sur la même ligne. Les lignes d'assemblage représentées en traits discontinus ne seront pas installées car elles ne sont pas nécessaires.

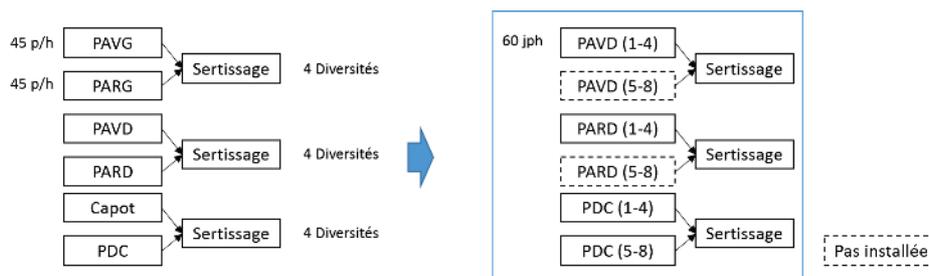


Figure VI.8 – Solution H2C : Installer une nouvelle ligne flexible

Les numéros 1 à 8 correspondent aux diversités à produire sur la ligne.

## VI.3 Evaluation des solutions

Cette section présente les résultats de l'évaluation de l'impact des solutions sur les performances du système de production.

### VI.3.1 Evaluation des critères métier

Les critères qui permettent d'évaluer l'application des principales règles métiers relatives à la configuration de la ligne d'assemblage sont :

- **Critère 1** - Mode de chargement et moyen d'approvisionnement. Le moyen de chargement (ou d'évacuation) correspond au type de ressource permettant

### VI.3. Evaluation des solutions

---

d'alimenter ou d'évacuer la ligne d'assemblage. Le mode d'approvisionnement définit le type de moyen permettant d'acheminer les pièces au poste de chargement.

- **Critère 2** - Engagement des moyens. Ce critère représente la capacité globale de la ligne à réaliser des opérations à valeur ajoutée.
- **Critère 3** - Flexibilité au produit. La flexibilité au produit est la capacité du système à fabriquer plusieurs variantes de produit.
- **Critère 4** - Mode de fonctionnement. Ce critère permet de définir si un processus d'assemblage peut fonctionner selon un principe de conduite « à la demande » ou « par lot ».

Les résultats de l'évaluation sont synthétisés dans la matrice de décision de la figure VI.9 :

Solutions / critères	1-Appro	2- Engagement	3-Flexibilité	4-Fonctionnement
H0	2	0	3	3
H1A	2	1	3	3
H1B	2	1	3	3
H2A	2	1	3	3
H2B	2	1	1	2
H2C	3	2	4	4

Figure VI.9 – Matrice de décision pour les règles métiers

La solution H0 correspond à la configuration initiale décrite plus haut (§. VI.1.3). Elle a un niveau d'engagement plus faible que les autres.

La solution H1A, H1B et H2A ont le même niveau de performance d'un point de vue purement métier. Nous avons vu que l'utilisation d'une échelle standard pour l'agrégation des critères peut conduire à des ex-aequo. Toutefois, on en conclut que ces trois solutions respectent à un même niveau l'ensemble des règles métiers relatives à la configuration du processus d'assemblage.

La solution H2B qui consiste à ajouter une ligne manuelle pour la capacité supplémentaire est moins flexible puisque l'ajout d'une diversité nécessite de dupliquer la ligne.

La solution H2C est mieux notée sur l'ensemble des critères métier étant donné qu'il s'agit d'installer une nouvelle ligne robotisées flexibles à 8 diversités pour un besoin de 6 diversités à l'année N+2. Toutefois, cette solution permet d'anticiper une augmentation de capacité pour l'introduction de futurs véhicules.

### VI.3.2 Evaluation des critères projet

Dans ce paragraphe, une approche de surclassement est utilisée pour évaluer conjointement les points de vue métiers et projet. Les critères métiers retenus sont : la capacité maximale, le mode de fonctionnement et la flexibilité de la ligne de production. Les critères projet qui sont pertinents pour notre étude sont : l'investissement initial, le coût de reconfiguration et le délai de reconfiguration. L'idée est de garder les unités usuelles des critères au lieu d'agréger l'ensemble des critères en une valeur unique qu'il faudra ramener à une échelle unique pour faire la comparaison. Ensuite, nous proposons un classement des solutions et une synthèse permettant de faire des compromis.

- Investissement : correspond au coût des moyens de production à installer pour une solution donnée.
- Coût de reconfiguration : correspond à l'investissement supplémentaire pour l'ajout de véhicules sur la ligne.
- Capacité maximale
- Mode de fonctionnement : L correspond à un mode de fonctionnement par lot et D correspond à un mode de fonctionnement à la demande.
- Flexibilité : correspond au nombre de diversités de caisse de véhicule que l'on peut assembler sur la ligne.
- Délai de reconfiguration : Le délai de reconfiguration correspond à la durée en semaines des modifications.

Les valeurs de l'investissement et du coût de reconfiguration sont données à titre indicatif pour des questions de confidentialité. Toutefois celles qui sont utilisées pour cette étude sont représentatives.

#### VI.3.2.1 Application de la méthode Prométhée

La figure VI.10 présente les paramètres de l'étude tels qu'ils sont définis dans l'outil Visual Prométhée, développée par le laboratoire Lamsade (<http://www.promethee-gaia.net/resourcesF.html>). On retrouve l'ensemble des critères dans chaque colonne et l'ensemble des solutions dans les cinq dernières lignes de la partie évaluation. Deux autres parties sont disponibles dans les lignes supérieures. La

### VI.3. Evaluation des solutions

Critères	H1A	H1B	H2A	H2B	H2C
Investissement	0,5	1	2	1,5	4
Coût de reconfiguration	1,5	1	1	2	0,25
Capacité maximale	45	45	60	60	60
Mode de fonctionnement	L	L/D	L/D	L	L/D
Flexibilité	6	6	6	6	8
Délai de reconfiguration	0,5	1	1,5	2	3

Tableau VI.1 – Matrice de décision pour la méthode Prométhée

partie statistique reprend quelques valeurs standards de chaque critère (min, max, moyenne, écart-type). La partie préférence propose des paramètres pour l'évaluation.

Les paramètres de l'évaluation correspondent aux paramètres de la méthode Prométhée présentés dans la section §. IV.4.1.2 :

- Min/Max : Est-ce que le critère est à minimiser ou à maximiser ?
- weight : Quelle est la pondération donnée à un critère en fonction de son importance ?
- Préférence fonction : quelle allure a la fonction de préférence ?
- Threshold : Permet de définir les seuils de préférence (P), les seuils d'indifférence (Q) et la fonction critère (S)

Scenario1	Investiss...	Cout rec...	Capacité...	Flexibilité	Délai de ...	Fonction...
Unit	k€	Ratio	v/h	unit	Week	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆
<b>Preferences</b>						
Min/Max	min	min	max	max	min	max
Weight	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Preference Fn.	V-shape	V-shape	Level	Linear	Linear	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	0,00	0,98	0,64	n/a
- P: Preference	€ 2,6	€ 1,26	16,35	1,78	1,84	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>Statistics</b>						
Minimum	€ 0,5	€ 0,25	45,00	6,00	0,50	0,00
Maximum	€ 4,0	€ 2,00	60,00	8,00	3,00	1,00
Average	€ 1,8	€ 1,15	54,00	6,40	1,60	0,60
Standard Dev.	€ 1,2	€ 0,58	7,35	0,80	0,86	0,49
<b>Evaluations</b>						
<input checked="" type="checkbox"/> H1A	€ 0,5	€ 1,50	45,00	6,00	0,50	no
<input checked="" type="checkbox"/> H1B	€ 1,0	€ 1,00	45,00	6,00	1,00	yes
<input checked="" type="checkbox"/> H2A	€ 2,0	€ 1,00	60,00	6,00	1,50	yes
<input checked="" type="checkbox"/> H2B	€ 1,5	€ 2,00	60,00	6,00	2,00	no
<input checked="" type="checkbox"/> H2C	€ 4,0	€ 0,25	60,00	8,00	3,00	yes

Figure VI.10 – Paramètres de l'étude dans Visual Prométhée

L'objectif de l'évaluation est de minimiser l'investissement, minimiser le coût de reconfiguration, maximiser la capacité de production, minimiser les délais de

## Chapitre VI. Application : assemblage des "ouvrants" d'une caisse de véhicule

reconfiguration et maximiser la flexibilité sur le mode de fonctionnement. Dans notre cas, le coût d'investissement a un poids plus important (1,5) par rapport aux autres critères. Pour plus de détail sur la méthode de définition des seuils d'indifférence et de préférence, le lecteur est invité à se référer à l'annexe 1.

Le premier résultat concerne le calcul des flux entrants et sortants de chaque solution pour l'établissement d'un classement. Le tableau VI.2 table des flux de puissance et de faiblesse de chaque solution. On peut constater que la solution H1B possède une valeur de flux net supérieur aux autres.

Solutions	Flux net	Puissance	Faiblesse
H1B	0.133	0.263	0.130
H2A	0.094	0.232	0.138
H2C	0.062	0.391	0.329
H1A	-0.064	0.216	0.280
H2B	-0.225	0.115	0.340

Tableau VI.2 – Table des flux des solutions

Le graphe de surclassement qui en résulte (fig. VI.11) permet d'identifier quelle solution surclasse les autres. Les flèches représentent des liens de surclassement. Les valeurs des flux  $\Phi^+$  correspondent à la puissance de la solution et les valeurs des flux  $\Phi^-$  correspondent à la faiblesse de la solution. Le flux net est la différence entre la puissance et la faiblesse. La solution H1B surclasse la solution H2A qui surclasse à son tour la solution H1A. La solution H2B est à la fois surclassée par la solution H1A et H2C.

### VI.3.2.2 Synthèse de l'évaluation : Plan GAIA

La figure VI.12 présente la synthèse GAIA de l'évaluation. Une analyse des caractéristiques des critères et des solutions (longueur, dispersion, projections) nous permet de faire les conclusions suivantes :

Concernant les critères, le plan montre ceux qui sont opposés. L'investissement et la flexibilité sont des critères opposés, car pour améliorer la flexibilité, il est nécessaire d'investir plus. Il en est de même pour le délai de reconfiguration et la capacité de production maximale. La longueur du vecteur capacité maximale montre qu'il a une faible influence sur le classement, contrairement au critère mode de fonctionnement. En fonction des principaux critères projet (investissement et délai de reconfiguration), les solutions H1A et H1B se démarquent des autres vu l'orientation des deux vecteurs critères.

Concernant les solutions, leur dispersion dans le plan permet de dire qu'il n'y a pas de solution ayant un profil de performance similaire. Il est possible de déterminer visuellement

### VI.3. Evaluation des solutions

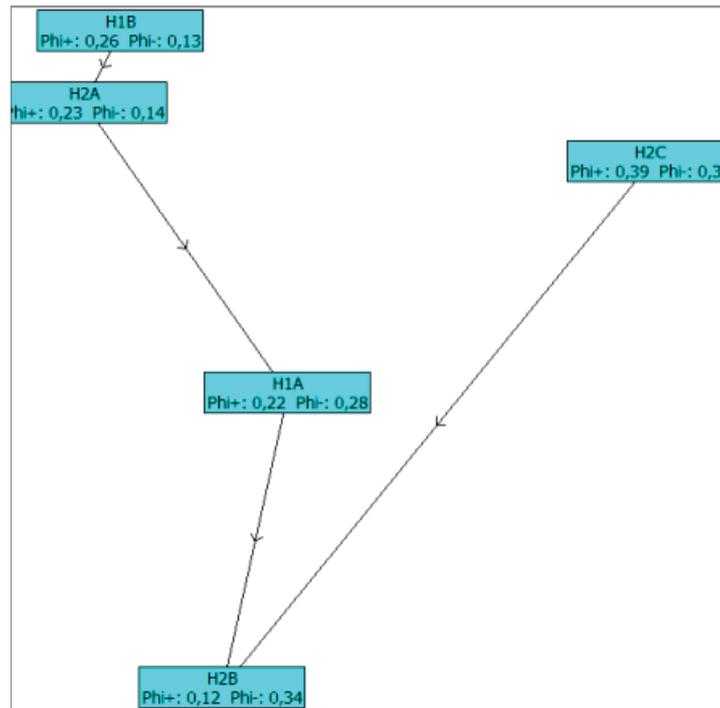


Figure VI.11 – Graphe de surclassement

les puissances et les faiblesses des solutions par projection successive sur les critères. Ces projections peuvent supporter de manière quantitative les avantages et inconvénients de chaque solution vis-à-vis des critères utilisés. Par exemple, en projetant la solution H1B sur le vecteur délai de reconfiguration, on peut avoir une idée de la valeur de sa puissance. Par contre si on projette cette solution sur le vecteur flexibilité, on a une idée de la valeur de sa faiblesse.

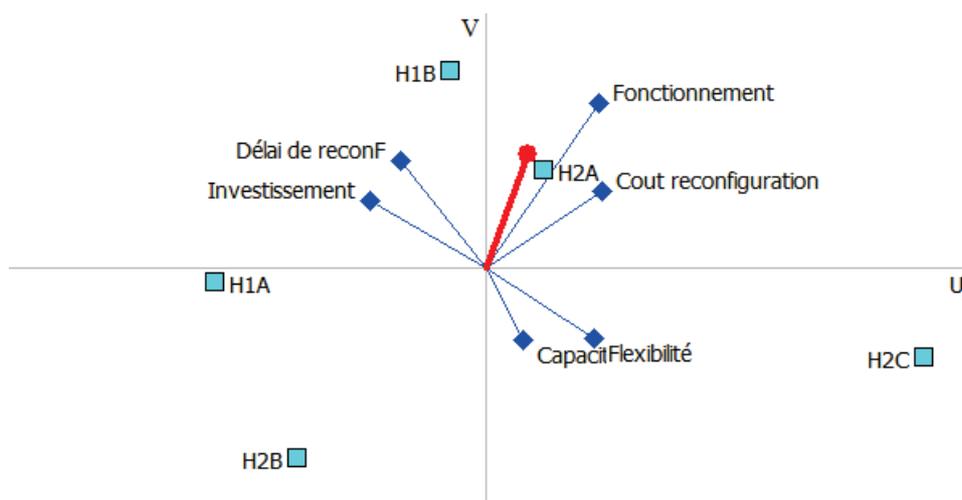


Figure VI.12 – Plan Gaia pour les choix de reconfiguration de la ligne de porte de coffre

### VI.3.2.3 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité permet d'affiner la synthèse présentée pour la prise de décision. Une première approche consiste à varier les poids affectés aux critères pour voir leur impact sur le résultat de l'évaluation. Une deuxième approche consiste à étudier les intervalles dans lesquelles ces pondérations n'ont pas d'impact sur le résultat de l'évaluation.

L'analyse de sensibilité par rapport aux poids affecté aux critères consiste à changer le poids d'un critère et de voir l'impact sur le résultat de l'évaluation. Cette étude permet d'analyser la robustesse de l'évaluation par rapport à la pondération. La figure VI.13 présente l'affectation des poids pour l'étude réalisée dans ce chapitre.

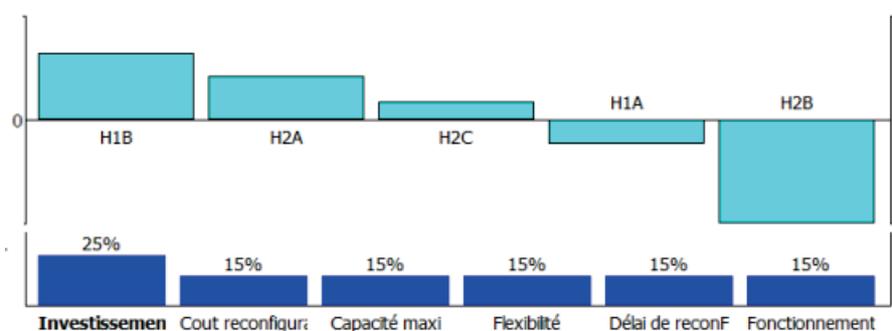


Figure VI.13 – Analyse de sensibilité : Affectation des poids

Dans la pondération initiale, le coût d'investissement est le critère le plus important (23%). En effet, l'immobilisation du capital investi est en général le facteur prépondérant pour les choix de reconfiguration de l'outil de production. En effet, elle impacte directement le retour sur investissement des projets de l'entreprise. Afin de voir l'impact de cette pondération sur le résultat de l'évaluation, on se propose de modifier l'importance relative du critère de coût de reconfiguration (33% au lieu de 15%). La figure VI.14 montre un changement dans le classement proposé : la solution H2C a un meilleur score par rapport aux autres solutions.

On peut en conclure que si le coût de reconfiguration est pris comme le critère le plus important, la solution H2C (Installer une nouvelle ligne neuve flexible à 8 diversités) est préconisée. Cela implique que des objectifs à long terme sur l'intégration de plusieurs produits (5 à 10 ans) sont pris en compte dans cette décision.

La deuxième approche d'analyse de sensibilité consiste à analyser des intervalles de stabilité de l'évaluation par rapport au poids affecté à un critère. Cette analyse propose à visualiser l'impact de la pondération sur la valeur du flux net ( $\Phi$ ). L'axe horizontale correspond au poids du critère sélectionné et l'axe vertical correspond à la valeur du flux net (fig.VI.15).

## VI.4. Conclusions

---

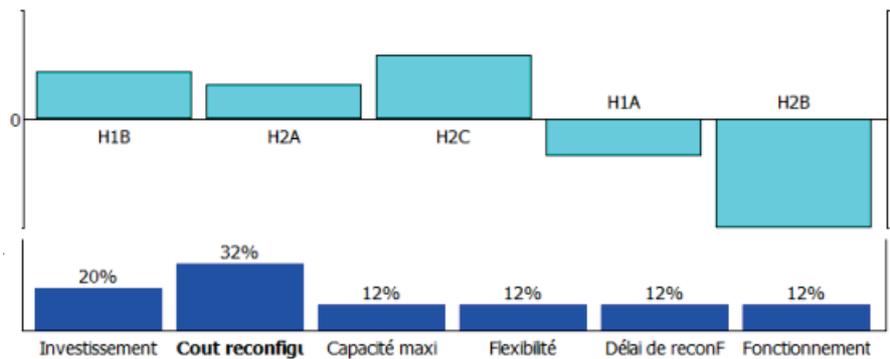


Figure VI.14 – Analyse de sensibilité : Modification de l'affectation des poids

Dans l'exemple de la figure VI.16, le score de la solution H2C décroît plus par rapport au score des autres critères quand le critère du coût d'investissement augmente. En effet, c'est la solution la plus chère tandis que les solutions H1A et H1B ont un score croissant puisque ces solutions sont moins coûteuses. L'intervalle de stabilité par les deux traits verticaux discontinus représente la zone dans laquelle le surclassement reste inchangé (23% dans le cas du critère d'investissement)

## VI.4 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons illustré à travers un cas d'étude industriel nos propositions concernant l'identification des solutions par une approche de reconfiguration progressive et l'évaluation des solutions par une approche multicritère.

Le contexte de l'étude a présenté le processus d'assemblage des ouvrants d'une caisse de véhicule. L'objectif est d'étudier les solutions possibles permettant de reconfigurer la ligne en vue d'introduire un nouveau produit qui présente deux diversités de porte de coffre.

Nous avons identifié cinq solutions en appliquant l'approche de reconfiguration progressive d'une ligne de production. Ces solutions sont principalement liées à une augmentation ou non de la capacité de production mais répondent à la contrainte principale d'intégrer deux diversités supplémentaires.

L'évaluation des critères métier a mis en évidence un classement ordinal qui prend en compte la faisabilité technique des solutions. La prise en compte de critères projet a permis d'intégrer le coût et le délai de reconfiguration. Une approche de surclassement Prométhée permet d'avoir une évaluation plus globale des solutions.

Cette application a permis de couvrir principalement les opérations de reconfiguration liées à une augmentation de capacité. Les critères d'évaluation qui ont été mis en évidence par le cas d'application n'est pas exhaustif mais plutôt représentatif des principaux points

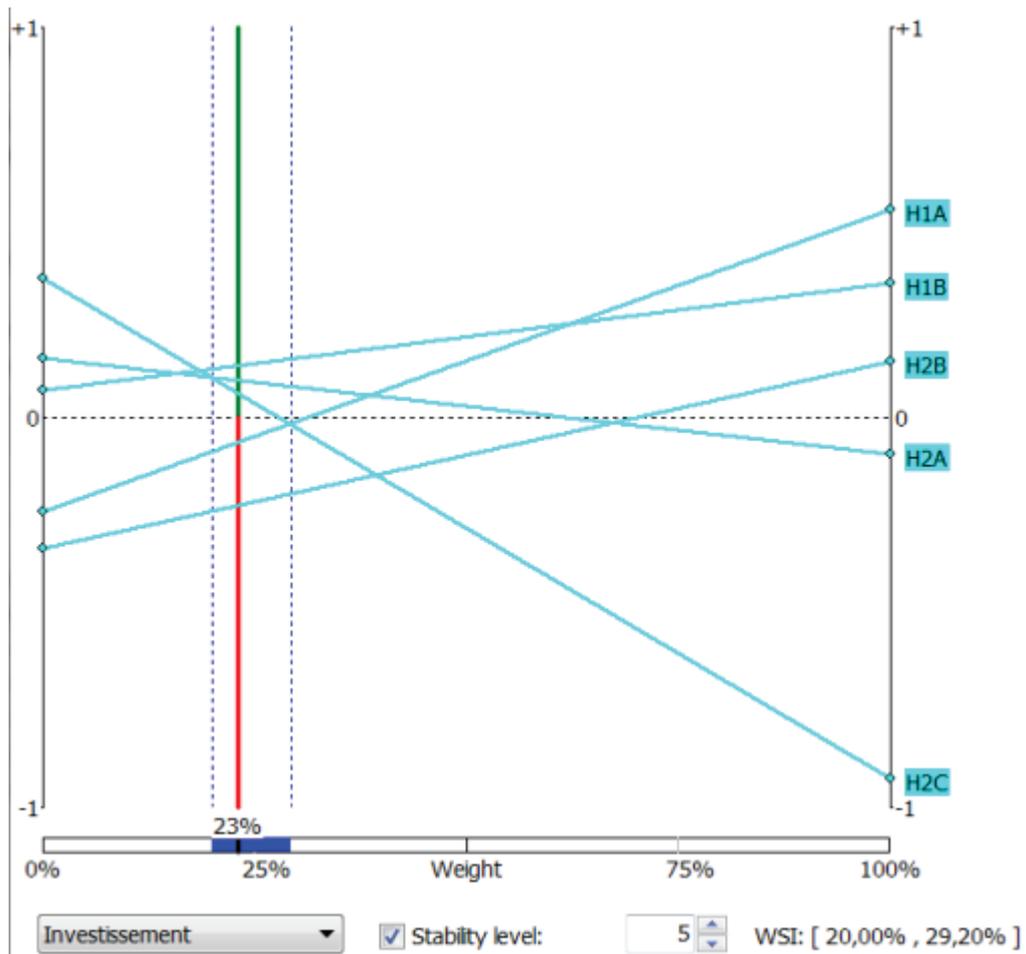


Figure VI.15 – Analyse de sensibilité : intervalle de stabilité de la pondération

de vue métier et projet.

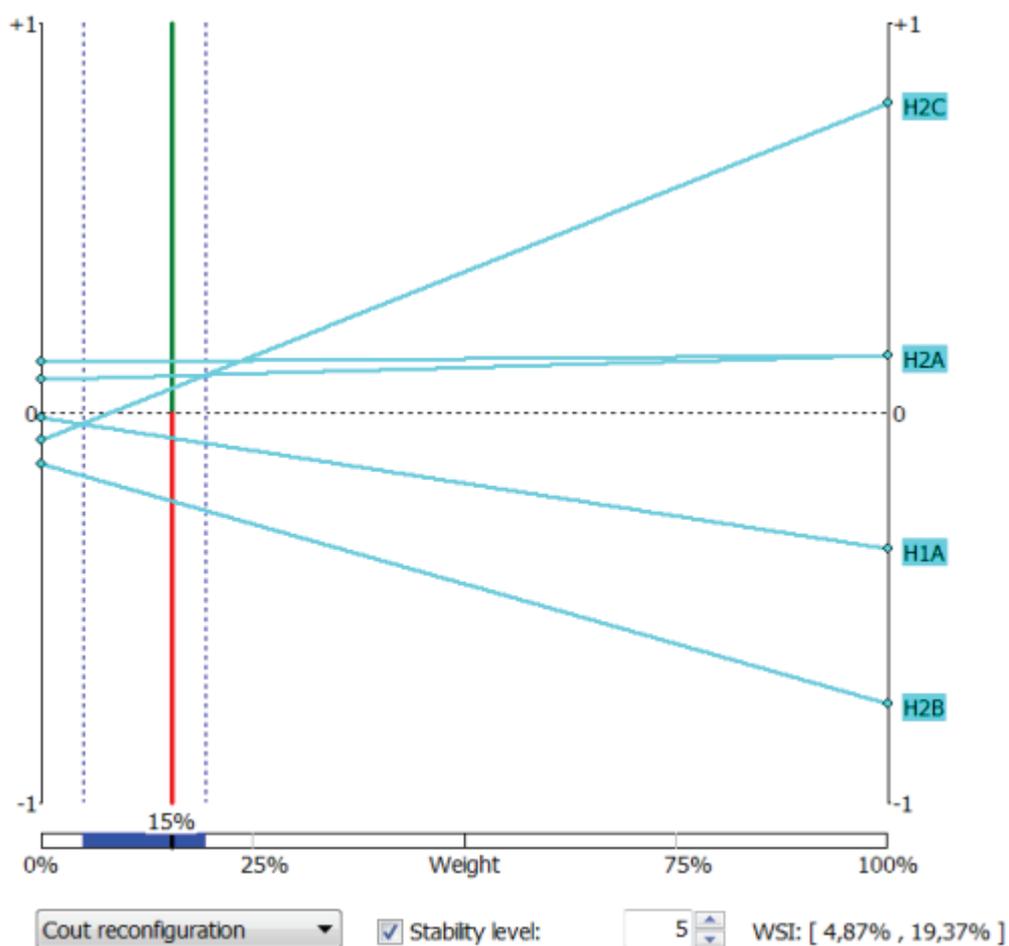


Figure VI.16 – Analyse de sensibilité : Modification de l'intervalle de stabilité de la pondération

